

研 究 報 告

令和 7 年 4 月 21 日

公益財団法人 前田記念工学振興財団

理 事 長 岸 利 治 殿

研究代表者

所 属 : 北海道大学大学院工学研究院

環境循環システム部門

氏 名 : 有馬 孝彦

研究課題名 : ハイパースペクトルイメージと深層学習を用いた自然由来重金属汚染土
壌の現場判定への適用

助成金額 : 100 万円

研究実施期間 : 自 令和 6 年 4 月 1 日 ～ 至 令和 7 年 3 月 31 日

ハイパースペクトルイメージと深層学習を用いた自然由来重金属汚染土壌の 現場判定への適用

Application of Hyperspectral Imaging and Deep Learning for Enhanced In-situ Screening of Soil and Rock Naturally Contaminated with Heavy Metals

北海道大学大学院工学研究院 助教 有馬 孝彦

（研究計画ないし研究手法の概略）

本研究では、自然由来重金属等を含む掘削土を対象に、掘削土の溶出特性を明らかにした上で、ハイパースペクトルイメージングと深層学習を組み合わせ、汚染レベルを判定するためのシステム構築をした。研究の進め方は図1および以下①～④のとおりである。

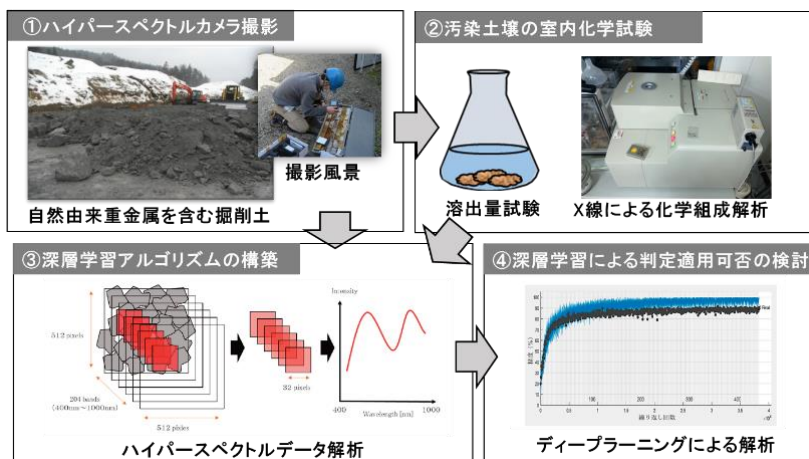


図1 研究実施フロー図

① ハイパースペクトルカメラ撮影

トンネル掘削現場から採取され

た自然由来重金属の砒素（As）を含む3種類の岩石をそれぞれ7試料ずつ（泥岩: Ms1-Ms7, 凝灰角礫岩: Tb1-Tb7, 安山岩: As1-An7）、計21試料を採取した。採取した岩石試料を破碎し、ハイパースペクトルカメラによりハイパースペクトルデータを取得した。ハイパースペクトルイメージングは400～1,000 nm（可視光・近赤外線）までの約200バンドのデータを取得した。

② 汚染土壌の室内化学試験（地球化学的特性の評価）

Asを含む21試料を対象に、化学試験（溶出量試験、含有量試験、逐次抽出試験）、粉末X線回折（XRD）、蛍光X線分析（XRF）を実施し、試料からのAs溶出特性、鉱物・化学組成等を評価した。

③ 深層学習アルゴリズムの構築

深層学習（ディープラーニング）として、畳み込みニューラルネットワーク（画像データ等から様々な特徴を検出するためのネットワーク）により、Asの溶出量および含有量を判定するモデルを構築した。モデル構築にあたり、21試料のうち15試料を教師データとしてモデルの学習を行った。

④ 深層学習による判定適用可否の評価

③で構築した判定モデルを用いて、21試料のうち教師データに用いなかった6試料をテストデータとしてモデルの判定精度を評価した。また、モデルの判定精度と試料中のAsの存在形態や溶出傾向を踏まえ、本手法の適用性について考察を行った。

（実験調査によって得られた新しい知見）

① ハイパースペクトルイメージングの特徴

2 mm 以下に破碎した 21 試料のハイパースペクトルデータを図 2 に示す。いずれのスペクトルデータも目立った特徴は確認されなかったが、460-600, 670-780, 860-950 nm の波長帯において、各試料に特徴的な変化が確認された。

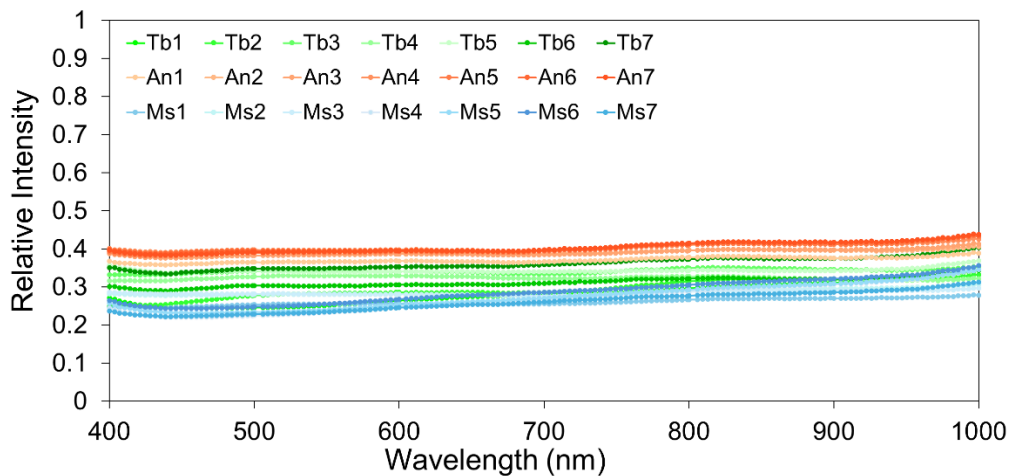


図 2 岩石試料より取得されたハイパースペクトルデータ

② 岩石試料からの As 溶出特性および存在形態

図 3 に溶出試験結果を示す。As の溶出量は Tb, An, Ms でそれぞれ 5.1~26, 0.9~6.1, 3.6~34 $\mu\text{g/L}$, pH はそれぞれ 8.1~8.3, 8.3~10.9, 8.1~9.8 となった。Ms と Tb の約半数の試料で土壌溶出量基準 (10 $\mu\text{g/L}$ 以下) に不適合となり, An は全ての試料で基準適合となった。pH についてはいずれの試料も弱アルカリ~アルカリ性を示したが, As 溶出量と pH との相関性は認められなかった。また, 図 4 に逐次抽出試験結果を示す。As の分画は主にイオン交換態, 有機物・硫化物態, 難溶態からなることが確認された。逐次抽出試験より得られた各分画の総量, すなわち As の全含有量は Tb, An, Ms でそれぞれ 21.1~184, 4.5~14.0, 7.2~151 mg/kg となり, Tb および Ms で As の全含有量が高かった。これらの岩相では XRD の結果から黄鉄鉱も同定されていることから, 本研究対象とした岩石試料中の As は主に黄鉄鉱中に胚胎したものと, イオン交換態として鉄等と錯体形成していると推察される。

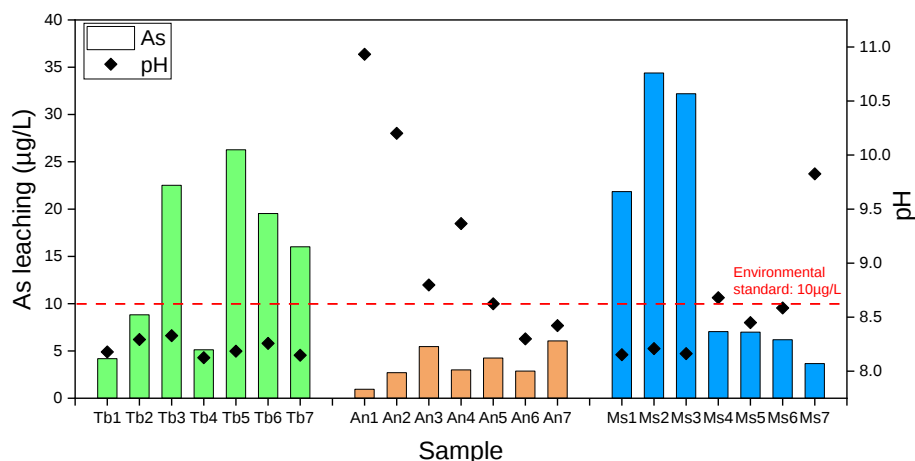


図 3 各岩石試料の As 溶出量および溶出液の pH

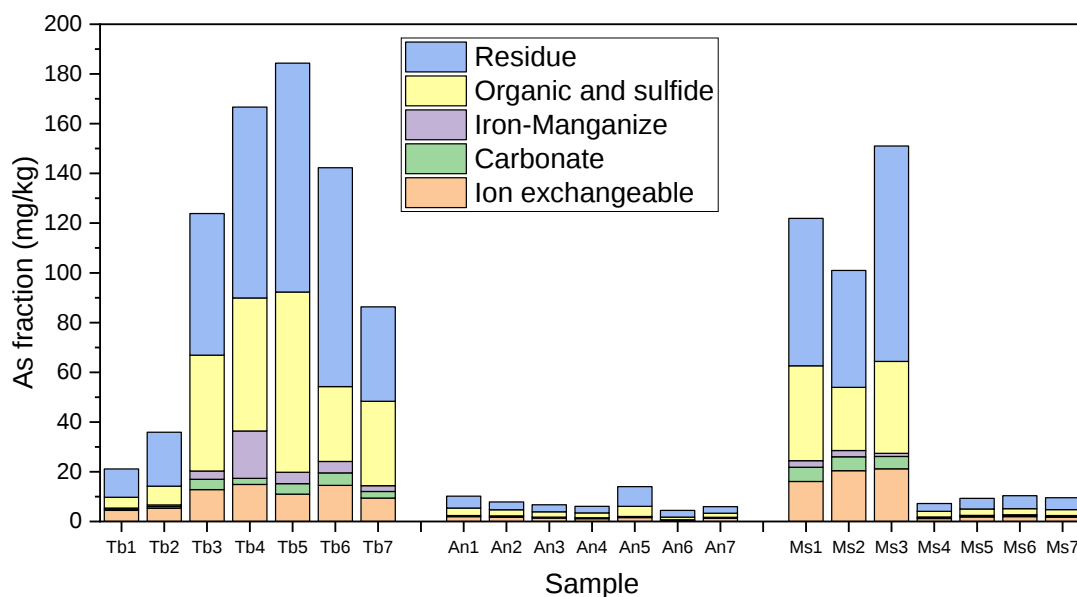


図 4 各岩石試料の As に対する逐次抽出試験結果

③ 判定モデルによる As 溶出量および含有量の予測結果

図 5 に機械学習により判定された As 全含有量および溶出量の推定結果を示す。As 全含有量については、高含有量帯（86-151 mg/kg）と低含有量帯（4.5-7.2 mg/kg）の大きな区分はできたが、測定値と推定値には相違（相関係数： $R^2=0.7836$ ）が認められた。As 溶出量については、テストデータの測定値（2.8-32 $\mu\text{g/L}$ ）に対して、若干の相違はあるものの、ある程度の判定精度（相関係数： $R^2=0.9038$ ）が確認された。これは、溶出量試験により溶出される As は主にイオン交換態に起因するものであるが、As の吸着に寄与すると考えられる岩石中の鉄やアルミニウムとハイパースペクトルが一定の相関性を有する可能性があると考えられた。一方、As の全含有量については、As を胚胎していると推察される黄鉄鉱や他の難溶鉱物とスペクトルデータとの相関性が、機械学習により抽出・評価できなかったと考えられる。

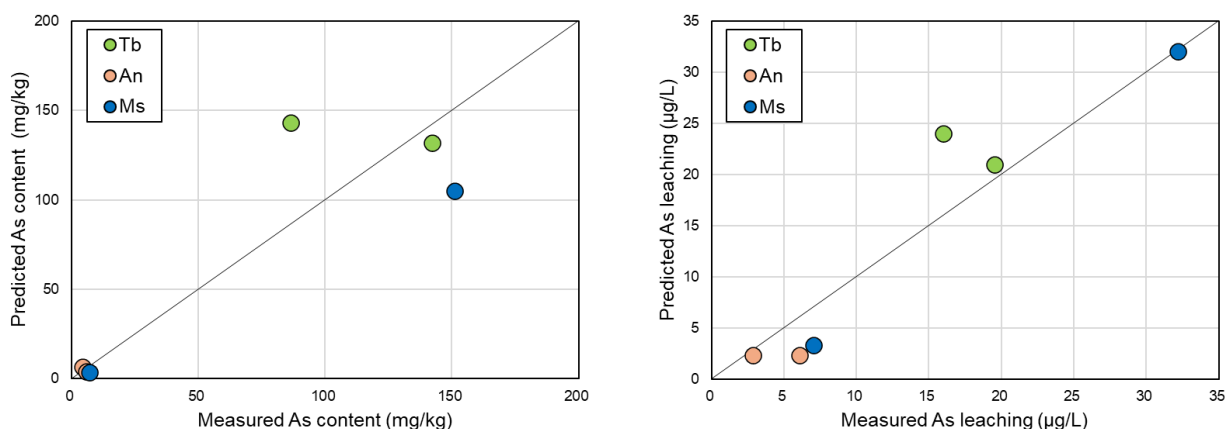


図 5 機械学習（CNN）による（左図）As 全含有量および（右図）As 溶出量の判定結果

④ まとめ

ハイパースペクトルデータと As 溶出量および As 全含有量の関係性を機械学習 (CNN) により評価し、自然由来の As を含むトンネル掘削土の対策要否を判定するためのモデルを構築した。本モデルは As 溶出量について一定の予測精度を有することが確認された。これは、As 溶出量に重要や役割を果たすイオン交換態のうち、試料に含まれる鉄やアルミニウムが、ハイパースペクトルデータと何らかの相関性を示したものと推察された。一方、As 全含有量は判定モデルにより十分な予測結果が得られなかった。これは、As 全含有量のうち、半分以上を占める有機物・硫化態や難溶態と関連する鉱物とハイパースペクトルデータとの間に十分な相関性が認められなかったためと考えられる。今後は教師データを増やすとともに、様々なパターンで As を胚胎する岩石試料に対する本モデルの適用性を検証する。

(発 表 論 文)

■論文投稿

なし (2025 年度中に海外査読付き論文へ投稿予定)

■学会発表

- 有馬孝彦他, 自然由来重金属等を含有する掘削土の評価・対策への新たなアプローチ, 資源素材 2024 (秋田) 口頭発表
- Takahiko Arima et al., Novel screening method for arsenic-bearing excavated rock utilizing hyperspectral imaging and deep learning, International Conference on Water: From Pollution to Purification (ICW-2024), India, Oral presentation.